县域尺度下关中地区农作物水足迹时空特征及影响因素

聂汉林， 樊良新， 郭 琎， 张梦可， 王志君
（河南理工大学测绘与国土信息工程学院，河南 焦作 454000）

摘 要： 探讨区域农作物水足迹与其时空分布规律及驱动因素，可以提高农业生产效率和水资源利用效益。本研究量化并分析关中地区54个县（区）2000—2020年冬小麦和夏玉米水足迹，并借助通径分析方法探究影响其绿水足迹、蓝水足迹及灰水足迹时空变化的驱动因素。结果表明：(1) 关中地区农作物总水足迹从2000年$2.232\times10^8\ m^3$下降到2020年$2.003\times10^8\ m^3$，其中，蓝水是最主要的水资源使用形式，其次是灰水，绿水使用量最少，三者占比分别为37.261%、36.254%和26.485%；(2) 农作物总水足迹空间上差异显著，呈现出东高西低和相似地区（高-高、低-低）集聚分布的特征；(3) 单位面积产量、平均风速和化肥施用量分别为影响绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹最显著的因素。本研究的结果有利于帮助关中地区节约水资源和提高用水效率，拓展农业水资源可持续利用思路。

关键词： 农作物；水足迹；影响因素；时空分布；关中地区

中国水资源十分短缺，人均水资源占有量不足世界人均水平的1/4。农业的发展离不开水资源。截止到2021年，全国农业用水为$3644.3\times10^8\ m^3$，占用水总量的61.5%[1]，水资源短缺会限制农业发展，威胁粮食安全。因此，全面评估农业生产中的水资源使用情况，能够探索农业水资源的供需情况与存在的问题，提高农业水资源用水效率和促进农业发展与水资源可持续利用之间的协调。水足迹的提出对于促进水资源的可持续利用和实现可持续发展具有重要意义。

“水足迹”被定义为生产某一产品所需的全部用水量，分为绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹。绿水足迹指产品生产过程中利用土壤中的水和蒸发的降雨量；蓝水足迹指的是作物生产过程中使用地表水或地下水的水量；灰水足迹指稀释污染物使其恢复到标准水质所需的淡水水量[2]。水足迹的提出拓宽了过去仅通过使用农田灌溉用水计算农业水资源消耗量的传统方式，细化了农作物生产过程中消耗的水资源来源以及引起的水资源污染[3]。随着水足迹理论和方法的成熟和完善，越来越多的研究采用水足迹来评估作物的水资源利用情况。国外学者对水足迹的研究主要从全球或国家角度展开，如2010年Mekonnen等[4]评估全球小麦的绿水、蓝水和灰水足迹；Hoekstra等[5]对全球水稻水足迹进行评估；Sangam等[6]利用DSSAT (CERES-Rice)作物生长模型，量化了气候变化对水稻生产水足迹的潜在影响；Yang等[7]计算了2001—2016年中国大陆14种主要作物的生产水足迹，揭示作物水分生产力及其经济价值之间的关系。国内学者主要从国家、省级和流域尺度对单一作物或多作物水足迹时空演变规律开展研究并探讨其影响因子。孙世坤等[8]对中国大陆小麦生产的水足迹进行空间特征分析，发现化肥和农业机械投入是影响小麦水足迹的主要农业生产因素，而太阳辐射和降水量是影响小麦水足迹的主要气候因素；郭相平等[9]对中国农作物水足迹时空分布与影响因素进行分析，发现影响农作物

收稿日期： 2023-05-23； **修订日期：** 2023-10-18
基金项目： 国家重点研发计划课题(2016YFC0501707)；河南省高校哲学社会科学创新团队(2022-CXTD-02)；河南省高校科技创新团队支持计划（22IRTSTHN008）；河南理工大学2020年度基本科研业务费专项项目（人文社科类）基于行为学框架下的家庭生活用水行为模型研究(SKJZD2020-10)
作者简介： 聂汉林（2000-），女，硕士研究生，主要从事区域可持续发展研究. E-mail: niehanlin2021@163.com
通讯作者： 樊良新. E-mail: fanliangxin@126.com

生产水足迹的主要驱动因子是人口密度、人均纯收入和化肥施用量；范星等[3]量化了三江平原粮食作物生产水足迹的时空特征，揭示出物候条件会影响粮食作物生产水足迹。上述研究表明，不同地区水足迹的特征与其变化规律存在时空差异，研究农作物绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹及总水足迹时空变化规律及影响因素是提高水资源利用效率的手段之一。因此，研究农作物的水足迹及其时空变化规律及影响因素尤为重要，通过深入了解不同作物对水的需求、气候变化、农业投入等因素对农业水资源利用的影响，进而制定合理的水资源管理和利用策略，以提高关中地区产量和农业水资源利用效率。

关中地区作为典型的农业种植区，农业耗水量为18.52×10^8 m^3，占陕西省总用水量的35.18%[10]，存在着水资源短缺压力，水资源消耗严重且利用效率低的问题。已有的研究对不同地区农作物水足迹及结构特征开展了大量探索，但基于县级尺度探讨关中地区农作物生产水足迹的研究还存在不足。冬小麦和夏玉米是关中地区种植规模最大的2种作物，提高这2种作物的用水效率可缓解关中地区的水资源匮乏。本研究基于水足迹理论，分析关中地区主要农作物（冬小麦、夏玉米）的用水特征，将解决以下问题：（1）计算关中地区农作物水足迹；（2）分析关中地区农作物水足迹时空特征；（3）量化影响关中地区主要农作物生产用水驱动因素。本研究的结果有利于帮助关中地区节约水资源和提高用水效率，为区域农业可持续发展提供指导和思路。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部地区（图1），位于33°30′~35°40′N、106°30′~110°30′E之间，包括西安、宝鸡、渭南、铜川、咸阳5个地市及杨陵区。该地区地处黄河流域下游，属暖温带半湿润半干旱气候，年平均气温12~14 ℃，年平均降水量为600 mm，集中于7—9月，海拔为460~850 m。2021年关中地区GDP总量为18502.71×10^{8}元，常住人口为2595×10^{4}人[10]，水资源总量为181.03×10^8 m^3[11]，人均水资源量为0.07×10^4 m^3·人$^{-1}$。该地区主要的粮食种植体系是小麦-玉米轮作，同时也在逐渐发展以油菜籽、豆类等油料作物为主的多种作物种植体系。关中地区集中了全省52%的耕地，75%的灌溉面积，灌溉条件装备齐全，农业生产潜力高，适于农业的发展，是陕西乃至全国重要的农业生产区。

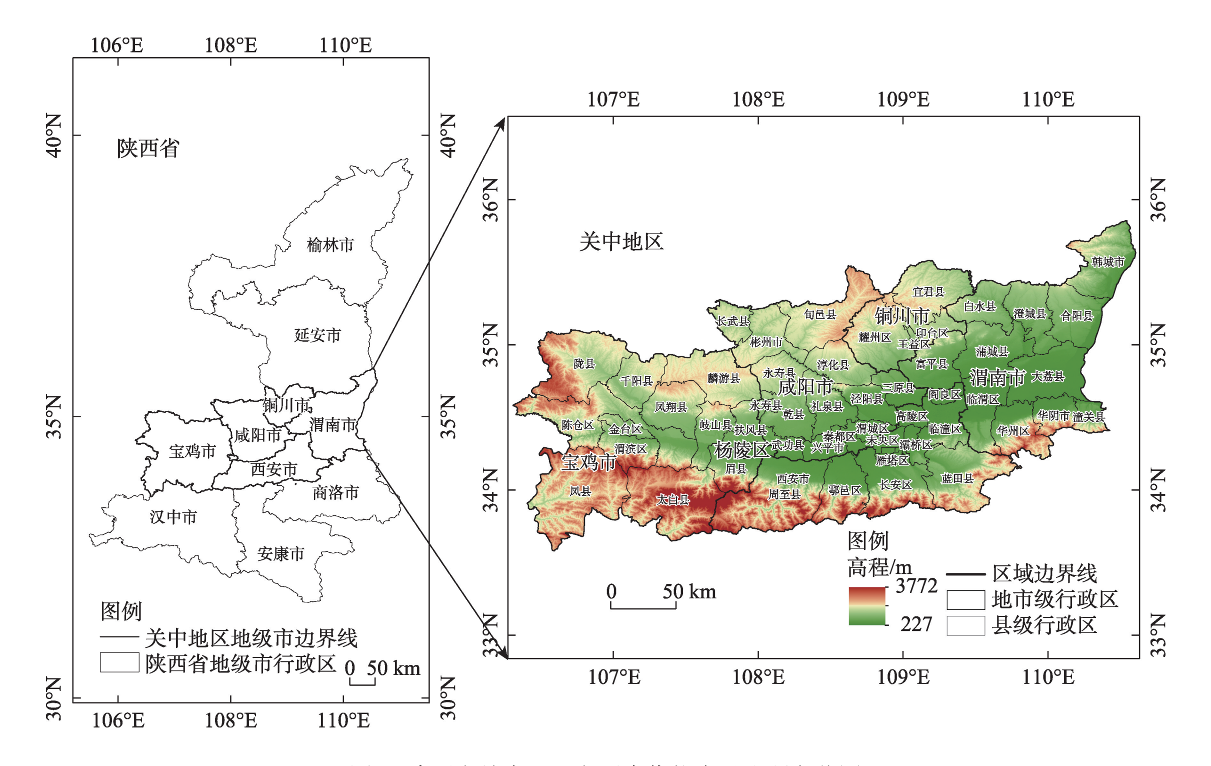


图1 陕西省关中地区主要农作物水足迹研究范围

Fig. 1 Study area of water footprint of major crops in Guanzhong region, Shaanxi Province

1.2 研究方法

1.2.1 *农作物水足迹核算方法* 本研究采用CROPWAT 8.0模型计算2000—2020年农作物绿水足迹和蓝水足迹，作物系数参照《北方地区主要农作物灌溉用水定额》[12]以及联合国粮农组织(FAO)灌溉排水(第56号)报告，采用氮元素作为衡量灰水足迹的指标[13-14]。

1.2.2 *时空分布特征测算方法*

(1) 空间自相关。空间自相关分析反映了地理区域内变量之间的空间依赖程度，已被广泛应用于水足迹。使用Global Moran's *I*来确定整个研究区域变量的空间聚类或分散程度。

(2) 重心迁移与冷热点分析。重心迁移反映要素年际间的空间变化趋势[15]。本研究对主要农作物2000—2020年作物水足迹总量进行重心轨道描述，基于ArcGIS软件对重心迁移轨迹制图。但重心迁移模型只能说明农作物水足迹加权平均值的时空变化情况，无法说明相似属性集聚区的分布特征[16]。冷热点分析可以展现高值(热点)或低值(冷点)空间聚集分布规律，已被应用于生态服务价值空间异质性[17]以及环境污染分布[18]等研究，本文依据最佳自然断裂点法(Nature breaks)将研究区域根据农作物水足迹的高低值分为4类，即热点区、次热点区、次冷点区、冷点区，以揭示农作物水足迹局部的空间集聚特征，通过识别冷热点地区为各地区针对性治理水足迹提供依据。

1.2.3 *通径分析* 通径分析在多元回归的基础上将相关系数进行分解为直接通径、间接通径和总通径系数，用来表示每个自变量对因变量的直接影响、间接影响和总影响。本研究使用通径分析方法分析不同因素对农作物水足迹的影响强度和作用机制，了解农业生产中的水资源利用情况，进而制定相应的管理策略和措施。

1.3 数据来源

本研究采用的2000年、2004年、2008年、2012年、2016年和2020年气象数据来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/data/)，包括降雨量、最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速、日照时数；涉及各地级市和县级农业相关作物生产数据，包括农作物产量，农作物播种面积、化肥施用量、农业塑料薄膜使用量和农药使用量，数据来源于《陕西省统计年鉴(2001—2021)》《宝鸡市统计年鉴(2001—2021)》《西安市统计年鉴(2001—2021)》《咸阳市统计年鉴(2001—2021)》《渭南市统计年鉴(2001—2021)》和《铜川市统计年鉴(2001—2021)》。

2 结果与分析

2.1 关中地区主要农作物水足迹时间演变特征

2000—2020年关中地区农作物总水足迹在不同年份间波动(图2)，从2000年2.232×10^8 m^{3}降低到2020年2.003×10^8 m^3，降幅为10.27%。农作物总水足迹值最低为2020年2.003×10^8 m^3，最高值出现在2012年，为2.431×10^8 m^3;农作物多年总水足迹平均值为2.277×10^8 m^3。绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹多年均值分别为0.603×10^8 m^3、0.848×10^8 m^3、0.825×10^8 m^3。研究期间，绿水足迹和灰水足迹上升，分别从0.468×10^8 m^{3}增加至0.605×10^8 m^3，从0.667×10^8 m^{3}增加至0.716×10^8 m^3,而蓝水足迹降低，从1.098×10^8 m^{3}减少为0.681×10^8 m^3。2000—2012年总水足迹呈现上升趋势，在2004—2008年尤为明显，相差0.139×10^8 m^3。2016—2020年呈现下降趋势，相差0.335×10^8 m^3，年均下降约10.269%。研究期内，农作物种植面积不断减小，产量不断增加(图3)，主要农作物总面积从1.727×10^6 hm^{2}减少到1.421×10^6 hm^2，总产量从6.46×10^6 t增加到7.13×10^6 t。小麦种植面积从1.104×10^6 hm^{2}减少到8.228×10^5 hm^2，产量从3.595×10^6 t增加到3.682×10^6 t，玉米种植面积从6.236×10^5 hm^{2}减少到5.980×10^5 hm^2，产量从2.866×10^6 t增加到3.452×10^6 t。2012年化肥施用量和单位面积产量值达到最大，相应灰水足迹值达到最大，且占总水足迹43.247%，故总水足迹值达到最大。研究期内，降水量逐年增加，且2000年产量、化肥施

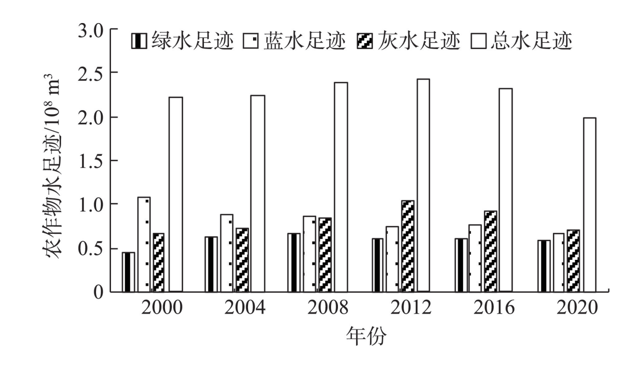


图2　农作物水足迹随时间变化

Fig. 2　Variation in crop water footprint over time

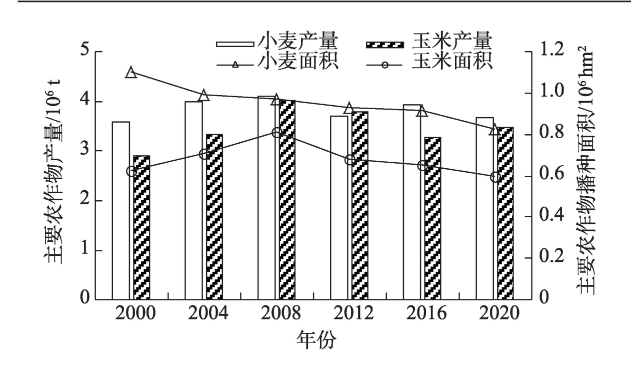


图3 农作物产量和播种面积时间变化趋势

Fig. 3 Temporal trends in crop crop yield and sown area

用量和单产值最低，绿水足迹、蓝水足迹值与降水量密切相关，故综合来看，2000年绿水和灰水足迹值最小，蓝水足迹值最大。

从作物类型来看(图4~图5)，冬小麦总水足迹从2000年1.558×10^8 m³下降到2020年1.274×10^8 m³；冬小麦绿水足迹以每年5.842×10^5 m³的速度缓慢上升；蓝水足迹呈线性下降，以0.059×10^8 m³的速度下降，由2000年最高值0.842×10^8 m³减少到2020年0.532×10^8 m³，平均减幅为36.852%；灰水足迹表现出波动减小的态势，由2000年0.428×10^8 m³减少到2020年0.418×10^8 m³，平均降低幅度约为2.325%；夏

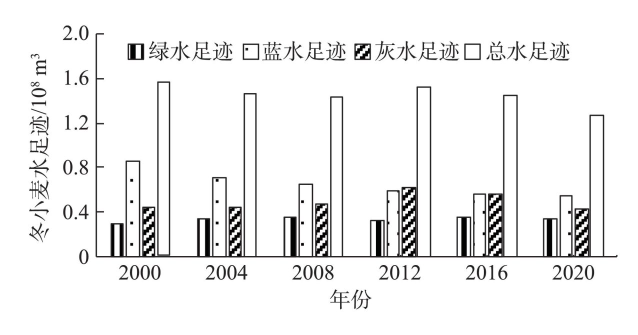


图4 冬小麦水足迹年际变化

Fig. 4 Interannual variation in the water footprint of winter wheat

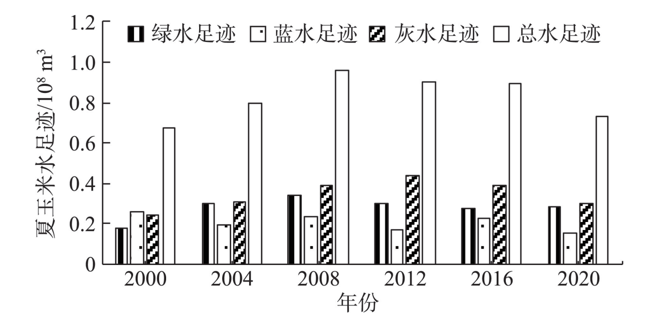


图5 夏玉米水足迹年际变化

Fig. 5 Interannual variation in summer corn water footprint

玉米总水足迹从2000年的0.674×10^8 m³增加到2020年的0.730×10^8 m³，增加了8.265%。夏玉米绿水足迹、灰水足迹和总水足迹均上升，蓝水足迹下降。

图6表示农作物水足迹总体构成，蓝水足迹占主导地位，占比37.261%，其次是灰水足迹，为36.254%，绿水足迹占比最少，为26.485%。绿水足迹占总水足迹比例逐年增加，从2000年占比20.954%增加到2020年30.226%。蓝水足迹占总水足迹比例下降，从2000年占比49.179%降至2020年34.016%。研究期内，灰水足迹的比例不断上升，表明污染严重。冬小麦水足迹以蓝水足迹为主，历年占比均值为44.114%，灰水足迹次之，历年占比均值为33.344%，绿水足迹最低，历年占比均值为22.542%。玉米水足迹以灰水足迹为主，历年均值为41.052%，绿水足迹次之，历年均值为33.537%，蓝水足迹最低，历年均值为25.411%。冬小麦是跨年度生长的作物，在其冬前和冬后2个生长高峰期内，正好与关中地区2个缺水峰期相遇，是缺水量比较多、灌溉需求比较强烈的作物之一[14]；夏玉米水足迹组成以灰水为主，绿水次之，蓝水最少，其生长周期短，生长季基本与当地雨季重合，因此，整个生育期的缺水量比较少，天然降水可以为其生长解决用水需求。

2.2 关中地区农作物水足迹空间分布特征

2.2.1 关中地区农作物水足迹空间分布特征 如图7所示，农作物总水足迹最高的富平县，为6.874×10^8 m³，最低的是碑林区0.494×10^4 m³，在空间上呈现出东部高西部低的趋势，高值区集中分布于东部地区，低值区位于西部地区；绿水足迹在空间上呈现南高北低的特征，高值区集中于南部地区，长安区绿水足迹值最高，为1.861×10^8 m³，碑林区绿水足迹值最低，为0.098×10^4 m³，低值区较少；蓝水足迹与总水足迹相似，呈现东部高西部低的特征，高值区在空间上集中于渭南市地区，最高的是蒲城县，为3.364×10^8 m³，碑林区蓝水足迹值最低，为0.396×10^8 m³；灰水足迹高值区集中于中东部地区，西部地区为低值区，最高的地区为富平县，高达2.926×10^8 m³，最低的地区为雁塔区，为1.492×10^5 m³。南部地区由于地势较为复杂，山地和丘陵地带较多，自然植被覆盖率高，土壤保水能力强，因此，南部地区绿水足迹相对较高。东部地势较为平坦，地下水资源丰富，并且受到黄河和渭河的影响，降水量较为充沛，

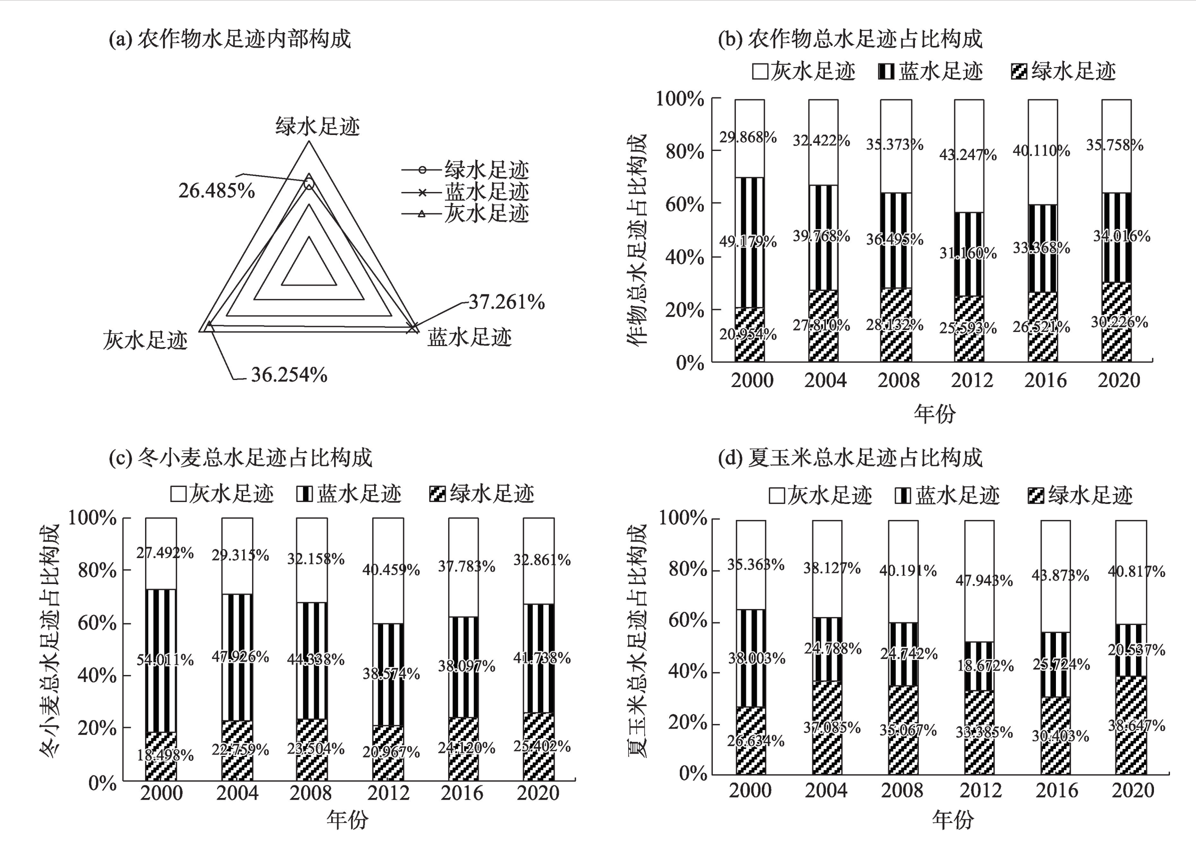


图6　农作物水足迹总体构成

Fig. 6　Overall composition of crop water footprint

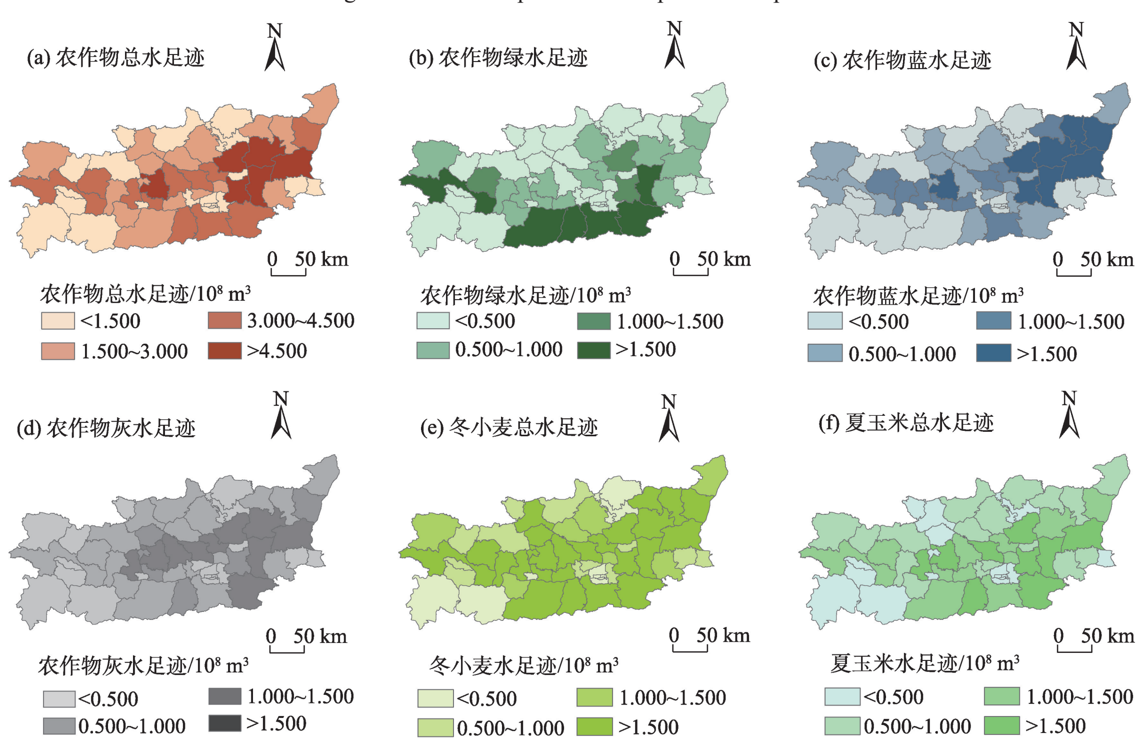


图7　2000—2020年关中地区农作物水足迹空间分布特征

Fig. 7　Spatial distribution characteristics of crop water footprint in Guanzhong region from 2000 to 2020

因此,既适合发展灌溉农业,也有较为充足的地表水资源。渭南市为农业种植区,其农作物播种面积与产量均高于其他市,水资源需求量高,故其蓝水足迹与灰水足迹高而绿水足迹低。西部地区产量

低,作物播种面积小,化肥施用量少,总体上绿水足迹与降雨量空间分布一致,而蓝水足迹与降雨量空间分布相反。农作物灰水足迹值与化肥施用量在空间分布上一致。关中地区农作物水足迹表现出一定的空间集聚性。冬小麦和夏玉米总水足迹高值区与其产量空间分布一致。冬小麦总水足迹主要分布在中东部地区,高值区比较多,高低值相差5.120×10^8 m^3。夏玉米总水足迹主要分布在东部与南部地区,高低值相差2.357×10^8 m^3。总体来看,关中地区中东部地区农作物水足迹较高,说明该地区农业生产对水资源需求较大,生态环境存在一定的压力,需采取相应的措施治理。

2.2.2 *农作物水足迹的空间聚类分析* 关中地区冬小麦、夏玉米水足迹在空间上呈现集聚分布状态,为准确探讨农作物水足迹空间关联关系,运用Global Moran's *I*对作物水足迹空间分区格局进行分析,分别计算出代表年农作物水足迹差异指标Moran's *I*值,结果见表1。全局Moran's *I*值均大于0,冬小麦和夏玉米均通过了显著性检验,说明关中地区主要农作物水足迹相似地区(高-高或低-低)在空间上呈显著性集聚分布。且冬小麦、夏玉米Moran's *I*值呈逐渐增大的趋势,说明农作物水足迹空间集聚程度逐渐增强,而非随机分布。这一现象说明了农作物种植在某些地区的水资源利用更为集中,而非随意分散。空间集聚程度逐渐增强也意味着需要采取更加有效的监管和管理措施,以确保水资源的合理分配和利用,避免过度集中导致部分地区水资源的损耗和浪费。

表1 关中地区农作物水足迹全局空间自相关系数

Tab. 1 Global spatial autocorrelation coefficient of crop water footprint in Guanzhong region

农作物	年份	Moran's *I*		
		Moran's *I*	*P*值	*Z*(*I*)
冬小麦	2000	0.229	0.003	3.006
	2004	0.253	0.001	3.316
	2008	0.266	0.001	3.455
	2012	0.264	0.001	3.443
	2016	0.259	0.001	3.400
	2020	0.382	0.000	4.651
夏玉米	2000	0.176	0.019	2.338
	2004	0.206	0.007	2.703
	2008	0.102	0.148	1.447
	2012	0.223	0.003	2.995
	2016	0.227	0.002	3.032
	2020	0.417	0.000	5.255

2.2.3 *农作物水足迹重心迁移和冷热点变化* 研究期间关中地区农作物水足迹重心变化(图8)不明显。绿水足迹重心在礼泉县,逐渐向北移动且靠近泾阳县;蓝水足迹重心从泾阳县向三原县转移;灰水足迹重心和冬小麦水足迹重心始终在泾阳县内移动;夏玉米水足迹重心从礼泉县向泾阳县转移逐渐靠近三原县。农作物总水足迹重心总体向泾阳县北方移动,保持相对稳定状态,说明关中地区农业生产方式和农作物种植结构相对稳定,未出现大规模的农业结构调整,需要特别关注泾阳县,礼泉县和三原县水资源的消耗情况。

农作物水足迹的高、低值集聚的分布状态,如图9所示,2000—2020年农作物总水足迹的空间冷热点分布及其变化呈现出明显的局部集聚趋势变化。总水足迹热点区在研究期内空间差异不大,热点区集中分布于东部地区,冷点区集中于西部地区,次热点区集中于南部地区。2000—2020年大部分地区保持稳定状态,冷点区减少,表明农业生产对水资源的需求呈现增加的趋势,因此,需要加强对这些区域的水资源管理和保护,并且鼓励农业生产者采用更加节水的农业生产方式,以减轻水资源的压力和提高资源利用效率。渭南市总水足迹值较大,结合农作物产量和播种面积可知,该地区高产但耗水量大,故应当对其进行用水管控;农作物绿水足迹在空间上差异显著,2000年绿水足迹热点区集中于西部和南部,逐渐向东部地区转移,研究期内冷点区增多,热点区无明显变化,说明农作物的绿水足迹利用方式存在一定的转移和调整,部分地区绿水资源利用量较低,导致绿水足迹冷点区增多,需要加强绿水资源的配置和管理,以实现更加合理和可持续的绿水资源利用。而热点区无明显变化,表明热点区农业生产水平和绿水资源利用效率已经达到了相对稳定的水平,需要关注此地绿水消耗量。蓝水足迹空间差异不明显,2000—2020年农作物蓝水足迹热点区始终集中于东部地区,冷点区始终处于西部地区,热点区和次热点区减少,冷点区增加,代表在研究期间内,蓝水足迹消耗量在减少,关中地区加强了蓝水资源的管理和调配,优化了农业生产结构,灌溉水利用率提高,从而实现了蓝水资源的合理配置和利用,减少了蓝水资源的

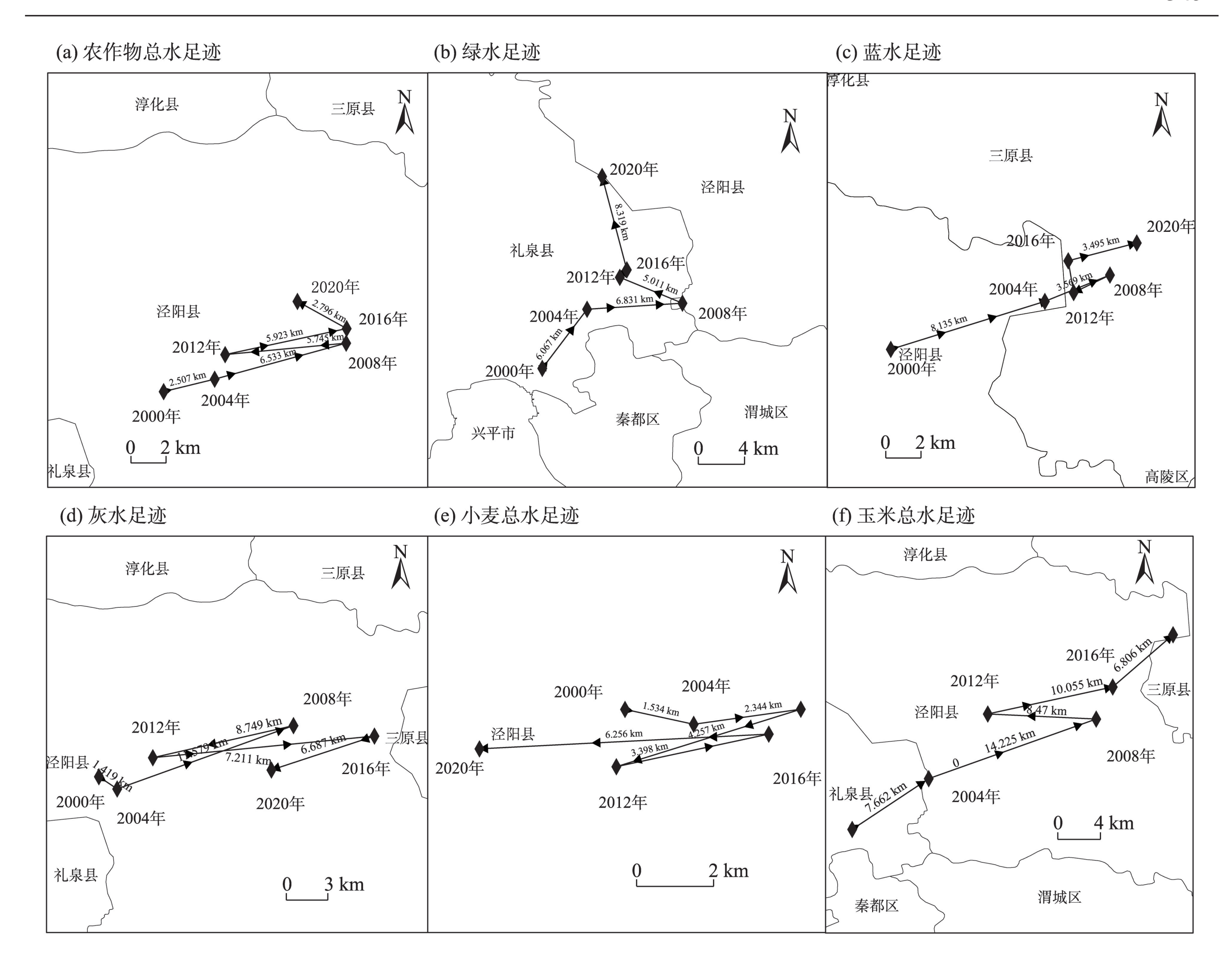


图8　2000—2020年关中地区农作物水足迹重心变化轨迹

Fig. 8　Trajectory of the center of gravity of the water footprint of crops in the Guanzhong region from 2000 to 2020

浪费和过度利用;灰水足迹热点区逐渐向东部地区转移,次热点区增加,代表污染区增加。研究期间农作物总水足迹、蓝水足迹和绿水足迹冷点区和次冷点区聚集中北部地区,且变化不明显。

2.3　农作物水足迹影响因素分析

农作物生长需水量会受到当地气候条件和农业投入要素的影响,其中,气象因素如降水量、温度、湿度等对作物生长过程耗水量产生一定影响;农业投入如有效灌溉面积、农业机械化动力、农业塑料薄膜使用量等对作物产量有一定影响,从而影响农作物水足迹。本研究利用通径分析量化气象因素与农业投入因素对关中地区农作物水足迹的影响。为了分析引起农作物水足迹差异的主要因素,参照相关文献[8-9, 19],选取平均气温、相对湿度、平均风速、日照时数、单位面积产量、单位面积氮肥施用量、农业塑料薄膜使用量和农药使用量8个参数分析影响农作物水足迹的主要因素。

2.3.1　相关分析　对关中地区农作物水足迹与影响因素进行相关分析,建立相关矩阵,探讨相关影响因子与水足迹之间的关系,结果见表2。

分析结果显示,农作物绿水足迹与相对湿度、单位面积产量和农药使用量呈显著的正相关关系;农作物蓝水足迹与平均风速呈显著的正相关关系,与相对湿度、单位面积产量、化肥施用量、农业塑料薄膜使用量和农药使用量呈显著的负相关关系;灰水足迹和单位面积产量、化肥施用量、农业塑料薄膜使用量和农药使用量呈现显著的正相关关系。

2.3.2　通径分析

(1) 影响农作物绿水足迹的通径分析

分析图10中各因素的直接通径系数可知,农作物绿水足迹与相对湿度和单位面积产量呈现正相关关系,与农药使用量呈现负相关关系。对农作物绿水足迹直接影响最大的是单位面积产量。结合各影响因素通过对其他因子的间接通径系数分析

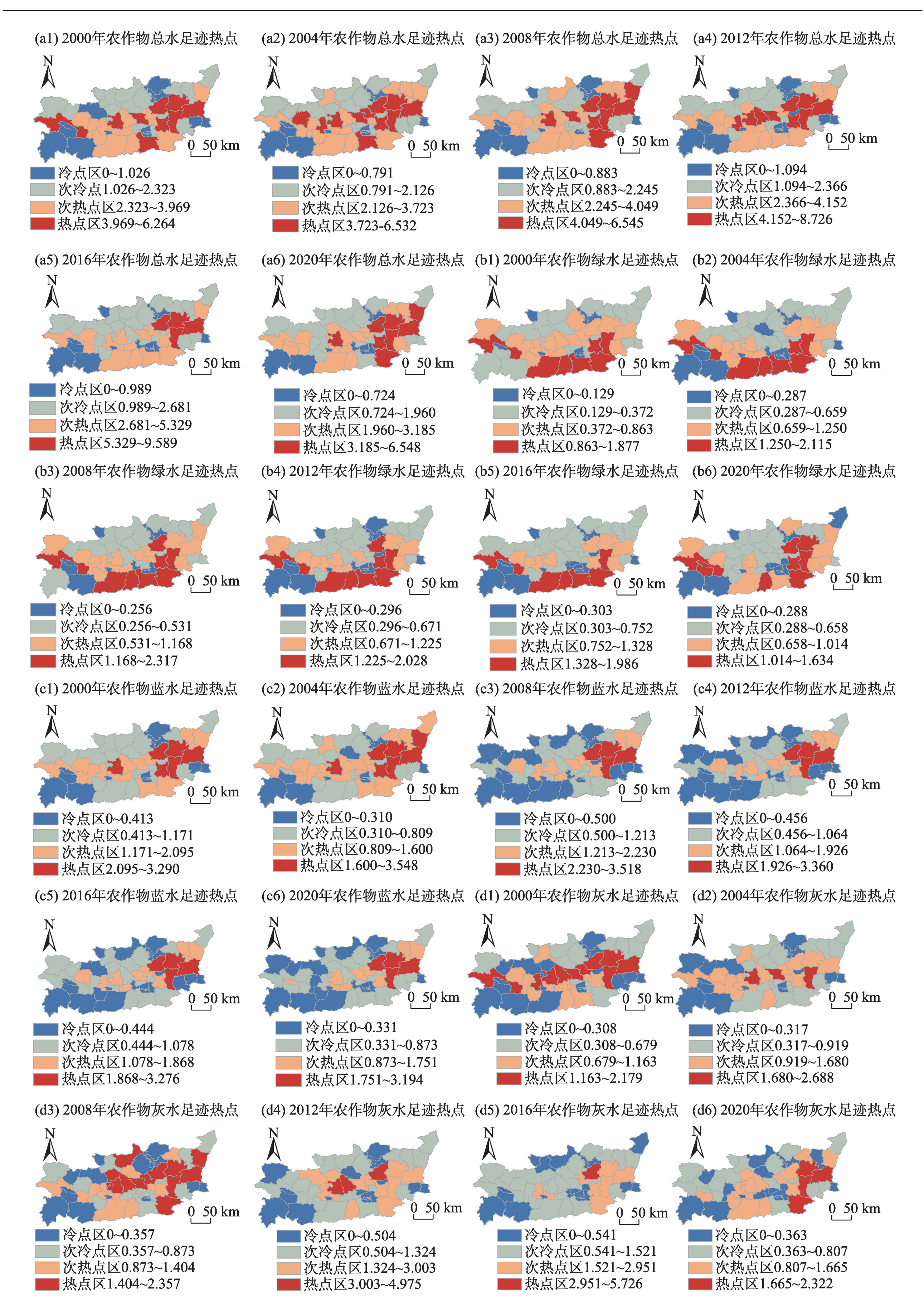


图9 关中地区农作物水足迹冷热点空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of cold hot spots in the water footprint of crops in the Guanzhong region

表2　关中地区绿水足迹、蓝水足迹及灰水足迹影响因素相关系数

Tab. 2　Correlation coefficients of green water footprint, blue water footprint and gray water footprint impact factors in Guanzhong region

影响因子	蓝水足迹	绿水足迹	灰水足迹
平均气温	0.152	0.168	−0.031
相对湿度	−0.791**	0.578**	0.387
平均风速	0.844**	−0.433	−0.248
日照时数	0.326	−0.047	−0.359
单位面积产量	−0.746**	0.704**	0.473*
化肥施用量	−0.718**	0.422	0.732**
农业塑料薄膜使用量	0.018	0.342	0.476*
农药使用量	−0.727**	0.471*	0.677**

注:*表示 $P<0.05$;**表示 $P<0.01$。

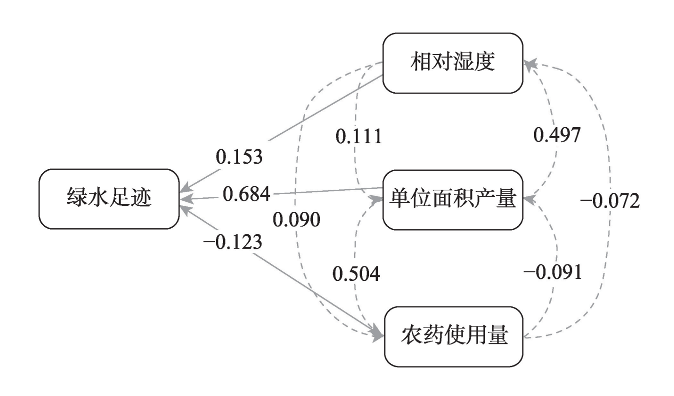


图10　关中地区主要农作物绿水足迹通径分析解析图

Fig. 10　Analysis of green water footprint analysis of major crops in Guanzhong region

可知,单位面积产量依旧对绿水足迹的总影响最大,然后是相对湿度和农药使用量。更高的单位面积产量意味着更高的水分利用效率和更高的水资源需求,消耗的绿水更多;相对湿度主要通过降水量来间接影响农作物绿水足迹,相对湿度越高,空气中的水含量越高,导致大气中水蒸汽含量增加,绿水足迹随之增加;农药使用量过多会污染土壤和水环境,进而影响水资源的质量和可用性。

(2) 影响农作物蓝水足迹的通径分析

从各因素直接通径系数分析(图11),农作物蓝水足迹与平均风速呈正相关关系,与相对湿度、单位面积产量、化肥施用量和农药使用量呈现负相关关系。对农作物蓝水足迹直接影响最大的是平均风速。结合各影响因素对其他因子的间接通径系数分析可得,平均风速仍然是农作物蓝水足迹最大的影响因素,然后是相对湿度、农药使用量、单位面积产量和化肥施用量。风速直接影响作物冠层的水汽扩散速率,对作物蒸发蒸腾过程产生影响,进而影响作物的水足迹[8]。农药使用量过多会污染土壤和水体,影响水资源质量和数量。

(3) 影响农作物灰水足迹的通径分析

从各因素直接通径系数分析(图12),农作物灰水足迹与化肥施用量、农业塑料薄膜使用量和农药使用量呈现正相关关系,与单位面积产量呈现负相关关系。对农作物灰水足迹直接影响最大的是化肥施用量。从各因素间接通径系数分析,可以发现化肥施用量仍然是对农作物灰水足迹影响最为显著的因素。适量投入化肥可以提高农作物的产量和品质,但过多会导致养分流失和土壤污染,从而增加农作物的灰水足迹;农业塑料薄膜可以提高土壤温度和保水性,促进作物生长,但过量会导致土壤污染和塑料垃圾污染,致使农作物灰水足迹增加;单位面积产量的提高可以减少农作物生产的面积,从而减少土地使用,同时意味着更高的水资源需求,高效农作物品种和种植技术能够使农作物在相同的水量下获得更高的产量,从而减少了灰水足迹。

综上所述,单位面积产量为影响绿水足迹最大的因素,平均风速对农作物蓝水足迹影响程度最大,其次是农药使用量和相对湿度;化肥施用量对农作物蓝水足迹影响最大。从各因素对农作物水足迹影响可以看出,农业投入要素因子对农作物水足迹的影响明显高于气象因素因子,说明引起区域水足迹差异性主要以生产水平和农业投入要素为主。

3　讨 论

关中地区2000—2020年农作物总水足迹呈现

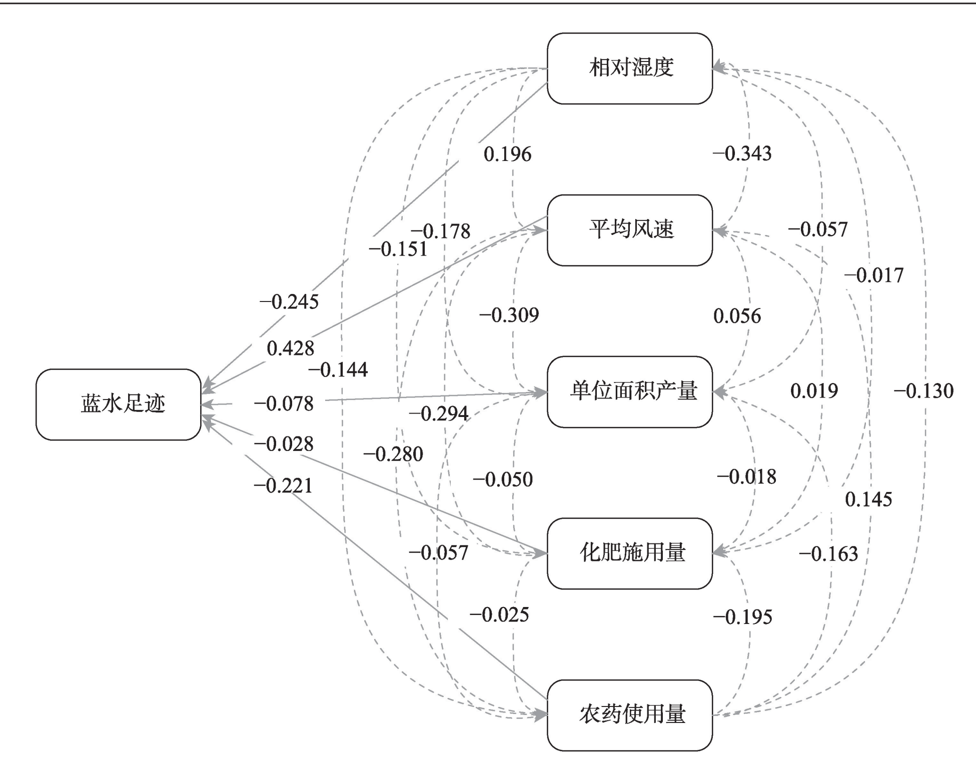


图11 关中地区主要农作物蓝水足迹通径分析解析图

Fig. 11 Analysis of the blue water footprint of major crops in the Guanzhong region

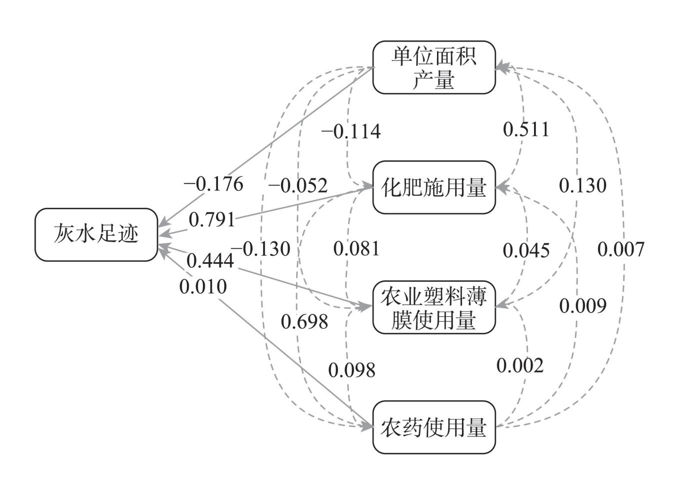


图12 关中地区主要农作物灰水足迹通径分析解析图

Fig. 12 Analysis of gray water footprint of major crops in Guanzhong region

下降趋势,绿水足迹上升,蓝水足迹下降,灰水足迹下降,这与操信春等[20],闫晨健等[1],姜秋香等[21],高洁等[22]研究一致。与冯变变等[23],薛冰等[24]研究不同,这是因为本研究扩展了研究水足迹的范围,将灰水足迹纳入至研究范畴且数据来源和计算空间单元的不同,另外,关中地区以灌溉水为主,地形特征存在差异。

关中地区水足迹呈现出蓝水为主、绿水为辅的农作物生产用水格局,说明灌溉水为农作物生长过程中的主要耗水,这与西北地区稀少的降水量有关,使得农作物多需灌溉用水或地下水的补给来维持耗水[25]。农作物总水足迹在空间上呈现出东部高,西部低的特征。关中地区农作物水足迹相似地区在空间上呈显著性集聚分布。农作物总水足迹重心围绕着咸阳市泾阳县逐渐向北迁移。说明该地区的农业生产方式和农作物种植结构相对稳定,未出现大规模的农业结构调整和农作物品种变化,随着人口增长和经济发展,水资源压力仍然很大,需要重点关注此地区水资源消耗。由于农作物水足迹重心向北迁移,中国北部地区干旱问题存在较长时间,未来随着水资源需求的增加以及气候变化的影响,北部水资源挑战会越来越大,对当地农业生产和生态环境都会带来很大的影响,因此,要加强水资源的保护和管理,适当减少高耗水农作物种植,提高农业水资源利用效率[26]。制定严格的水资源管理政策和法规,对超采、乱采、乱用、乱排等行为进行严格处罚,加强对水资源的保护和治理。冷热点分析结果可以看出,农作物总水足迹、蓝水足迹和绿水足迹冷点区和次冷点区聚集中北部地区,且变化不明显,表明这些区域对水资源利用效率不高,需要推广节水技术,优化农业结构,制定科学的

水资源利用规划，提高水资源利用效率，以应对未来水资源挑战。

降雨量对于土壤中储存的水分量有着直接的影响，蒸散发和蒸腾会影响地下水和地表水的含量和流量。相对湿度和平均风速是影响蒸散发和蒸腾的主要气象因素，因此，相对湿度和平均风速为影响关中地区农作物水足迹的主要气象因素。除了气象因素，农业生产投入要素也会影响农作物的水足迹。关中地区降水量充沛，但降水分布不均，导致农作物生长阶段需水时间分配不一致，从而影响了农作物的生长和产量，导致绿水利用率不高。对降水进行合理分配是提高绿水利用率的有效举措，可以通过改善农田水利设施，增加土壤持水能力，提高降水资源的利用效率，同时鼓励采用雨水收集利用等技术；充分考虑自然特征和区域水资源状况，合理规划种植作物类型、面积和规模，在提高单产的同时减少对绿水资源的消耗。关中地区耕地面积多，农田灌溉面积大，灌溉需求量大[27]，而灌溉用水的增加是水足迹增长的主要因素之一，应提高灌溉水利用率，减少蓝水足迹，降低农业水资源消耗量；同时可以采取遮风、采用高效节水灌溉技术、制定合理的化肥使用标准、采取节水机械化作业等措施，从而实现蓝水资源的可持续利用。灰水足迹占冬小麦、夏玉米水足迹的比例均偏高，表明大量的化肥使用对农业面源产生污染导致灰水足迹，减少农作物生产过程中对化肥和农药的使用能够缓解其对水环境产生的负面影响。灰水足迹高值区集中于东部地区，研究期内化肥施用量增加，农业面源污染带来了极大的威胁，化肥和农药是重要的农业生产投入要素，适量使用化肥和农药可以提高农作物的产量和品质，增加农业生产效益，促进农业现代化，在一定程度上增加粮食产量和减少水足迹，但农业生产不能过度依赖化肥和农药的使用，滥用会导致土壤肥力的下降，削弱耕地的生产能力，造成农业面源污染和农产品质量下降[28]，应做到科学施肥，提高其利用率，满足作物对养分需求时不再施加，在保障农作物产量的同时减少化肥施用量与农药使用量，优化养分管理[29]，实现精准施肥，降低由水环境污染引起的的水资源消耗[30]从而控制农业用水量，减缓水资源压力。单位面积产量与绿水足迹呈正相关关系，与蓝水足迹和灰水足迹呈负相关关系，适度增加农业生产资料投入、通过科学种植管理、推广水资源节约技术、推广循环农业技术和建立污染物治理体系等措施，可以有效地管控单位面积产量对农作物的绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹的影响。

建议采取以下措施对农作物水足迹进行调控：（1）对降水进行合理分配是提高绿水利用率的有效举措，在不同地区之间进行水资源交流，例如通过建设水利工程、水资源调配工程等，将降水从水资源丰富的地区输送到水资源匮乏的地区，以实现水资源的优化配置和利用；修建蓄水池，在降雨较多的季节将雨水存储起来，以备旱季使用，从而减少对降水量的消耗。加强土壤保育，如改善土地质量、增加有机质等，可以提高土壤的蓄水保水能力，增强土壤的持水能力，从而降低作物对灌溉水的需求，减少农业用水量，降低作物的水足迹；（2）提高农业水资源利用率。灌溉是农业生产中消耗蓝水足迹最多的环节之一，通过改善灌溉设施，如推广滴灌、喷灌等节水灌溉技术，优化灌溉管道网络，加强灌溉设施的管理和维护可以减少水分蒸发和土壤蒸发，提高灌溉效率，从而减少对灌溉水资源的消耗，减少蓝水足迹；（3）加强农业废弃物的处理和利用，如制成有机肥料、生物质燃料等，可以减少农业生产中的灰水排放和污染。合理的施肥技术可以提高养分利用效率，减少农业生产中的养分流失和污染。采用精准施肥、有机肥料等技术，加强农业污染防治，如加强农田环境监测、加强污染源管控等减少农业生产中灰水排放和污染。

4 结 论

本研究运用水足迹理论分析了关中地区2000—2020年主要农作物水足迹时空演变特征，并采用通径分析方法对影响农作物水足迹区域差异的因素进行深入探究，揭示了农业生产带来的区域水资源压力，为优化农作物种植结构、节约水资源和提高用水效率提供借鉴。主要结论如下：

（1）2000—2020年关中地区农作物总水足迹整体呈下降趋势，从2.232×10^8 m^3下降到2.003×10^8 m^3；在农作物水足迹内部结构中，蓝水足迹占主要地位，其次是灰水足迹，占比最少的是绿水足迹，三者占比分别为37.761%、36.254%和26.485%。

（2）农作物总水足迹空间上差异显著，呈现出

东高西低的特征,相似地区(高-高或低-低)呈集聚分布。

(3)单位面积产量、平均风速和化肥施用量分别为影响绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹最显著的因素。农业投入要素因子对农作物水足迹的影响明显高于气象因素因子。

参考文献(References):

[1] 闫晨健, 栗萌, 卓拉, 等. 1989—2019年陕西省作物生产水足迹时空演变与节水潜力评价[J]. 资源科学, 2023, 45(1): 158-173. [Yan Chenjian, Li Meng, Zhuo La, et al. Spatiotemporal evolution of water footprint and water-saving potentials of crop production in Shaanxi Province during 1989-2019[J]. Resources Science, 2023, 45(1): 158-173.]

[2] 张丽丽, 邓晓雅, 龙爱华, 等. 基于农业水足迹的水资源安全时空变化分析——以新疆和田地区为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 436-447. [Zhang Lili, Deng Xiaoya, Long Aihua, et al. Spatial-temporal assessment of water resource security based on the agricultural water footprint: A case in the Hotan Prefecture of Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 436-447.]

[3] 范星, 陈彬. 三江平原粮食作物生产水足迹时空特征及影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(15): 6368-6380. [Fan Xing, Chen Bin. Spatio-temporal patterns and influencing factors of the water footprint of grain crop production in the Sanjing Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6368-6380.]

[4] Mekonnen M M, Hoekstra Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(7): 1259-1276.

[5] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water Resources Management, 2007, 21(1): 35-48.

[6] Sangam S, Ranju C, Mukand S B. Quantifying the impact of climate change on crop yield and water footprint of rice in the Nam Oon Irrigation Project, Thailand[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599-600: 689-699.

[7] Yang X, Zhuo L, Xie P, et al. Physical versus economic water footprints in crop production: A spatial and temporal analysis for China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(1): 169-191.

[8] 孙世坤, 王玉宝, 吴普特, 等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 142-148. [Sun Shikun, Wang Yubao, Wu Pute, et al. Spatial variability and attribution analysis of water footprint of wheat in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(13): 142-148.]

[9] 郭相平, 高爽, 吴梦洋, 等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 295-302. [Guo Xiangping, Gao Shuang, Wu Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49 (5): 295-302.]

[10] 陕西省统计局, 国家统计局陕西调查总队. 2021年陕西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022. [Shaanxi Provincial Bureau of Statistics, Shaanxi General Investigation Team of the National Bureau of Statistics. Shaanxi Statistical Yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.]

[11] 陕西省水利厅. 2021年陕西省水资源公报[M]. 西安: 陕西省水利厅, 2022. [Shaanxi Provincial Bureau of Statistics. 2021 Shaanxi Statistical Yearbook[M]. Xi'an: Department of Water Resources of Shaanxi Province, 2022.]

[12] 段爱旺. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. [Duan Aiwang. Water Quotas for Irrigation of Major Crops in the Northern Region[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004.]

[13] 尹明财, 朱豪, 胡圆昭, 等. 甘肃省灰水足迹变化特征及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1810-1818. [Yin Mingcai, Zhu Hao, Hu Yuanzhao, et al. Analysis of various characteristics and driving factors of gray water footprint in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1810-1818.]

[14] 杜慧娟, 王光耀, 冉光妍, 等. 面向SDGs的塔里木河流域农业灰水足迹分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1184-1193. [Du Huijuan, Wang Guangyao, Ran Guangyan, et al. Agricultural gray water footprint in the Tarim River Basin using SDGs analysise[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1184-1193.]

[15] 王艺璇, 贾浩, 逯杰, 等. 黄淮海农作区花生生产水足迹及耗水结构分析[J]. 作物学报, 2022, 48(12): 3203-3214. [Wang Yixuan, Jia Hao, Lu Jie, et al. Water footprint and water consumption structure of peanut production in Yellow-Huaihe-Hai agricultural area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(12): 3203-3214.]

[16] 丁学谦, 吴群, 文高辉, 等. 2005—2019年洞庭湖平原耕地面源污染迁移轨迹及空间格局[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 258-266. [Ding Xueqian, Wu Qun, Wen Gaohui, et al. Water footprint and water consumption structure of peanut production in Yellow- Huaihe- Hai agricultural area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 37(15): 258-266.]

[17] 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 等. 黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 277-288. [Zhang Pengyan, Geng Wenliang, Yang Dan, et al. Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the Lower Reaches of the Yellow River Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(11): 277-288.]

[18] 张广纳, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1197-1209. [Zhang Guangna, Shao Jingan, Wang Jinliang, et al. Spatial and temporal variations of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1197-1209.]

[19] 封琼, 毕忠飞, 刘俊. 淮河流域主要农作物水足迹时空演变及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(6): 213-219. [Feng Qiong, Bi Zhongfei, Liu Jun. Spatial and temporal evolution of water footprint of main crops in Huaihe River Basin and analysis of influencing factors[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, 12(6): 213-219.]

[20] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1826-1835. [Cao Xinchun, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Agriculture water utilization assessment based on water footprint of grain production Evaluation in irrigated farmland of China[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(11): 1826-1835.]

[21] 姜秋香, 吴云星, 王子龙, 等. 黑龙江省水足迹时空分布规律及空间均衡分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 122-131. [Jiang Qiuxiang, Wu Yunxing, Wang Zilong, et al. Spatio-temporal distribution and spatial equilibrium analysis of water footprint in Heilongjiang Province[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 122-131.]

[22] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 105-112. [Gao Jie, Wu Pute, Xie Pengxuan, et al. Quantitative analysis of multi spatial and temporal distribution of blue-green water resources and crop production water footprint in irrigated areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 105-112.]

[23] 冯变变, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 山西省作物生产蓝绿水足迹核算及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 200-205. [Feng Bianbian, Liu Xiaofang, Zhao Yonggang, et al. Estimale of blue and green water footprint of crop production and analysis of its influencing factors in Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 200-205.]

[24] 薛冰, 董书恒, 黄裕普, 等. 1980—2016年辽宁省主要粮食作物生产水足迹时空演变特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2813-2820. [Xue Bing, Dong Shuheng, Huang Yupu, et al. Spatial-temporal evolution of water footprint during the production of main grain crops in Liaoning Province from 1980 to 2016[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(9): 2813-2820.]

[25] 高海燕, 李王成, 李晨, 等. 宁夏主要农作物生产水足迹及其变化趋势研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 110-118. [Gao Haiyan, Li Wangcheng, Li Chen, et al. Water footprints of main crops and their change in Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 110-118.]

[26] 李晓格, 张颖, 单永娟. 基于能值生态足迹模型的榆林市水资源可持续利用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1066-1075. [Li Xiaoge, Zhang Ying, Shan Yongjuan. Sustainable utilization of water resources in Yulin City based on an emergy ecological footprint model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1066-1075.]

[27] 张绍庆. 陕西省农业干旱动态风险评估与驱动力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023. [Zhang Shaoqin. Dynamic Risk and Driving Force of Agricultural Drought in Shaanxi Procince[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.]

[28] Ruttan V W. The transition to agricultural sustainability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(11): 5960-5967.

[29] Cao X, Zeng W, Wu M, et al. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309: 127371.

[30] 田嘉欣, 党小虎, 杨志, 等. 水足迹视角下黄土高原经济林果扩张的水安全风险分析——以苹果种植为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(10): 2750-2762. [Tian Jiaxin, Dang Xiaohu, Yang Zhi, et al. Analysis of water security risk of cash forest expansion in the Loess Plateau in terms of water footprint: A case study of apple planting[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(10): 2750-2762.]

Spatial and temporal characteristics of crop water footprint and influencing factors in Guanzhong region at the county scale

NIE Hanlin, FAN Liangxin, GUO Jin, ZHANG Mengke, WANG Zhijun
(School of Surveying, Mapping and Land Information Engineering, Henan University of Technology, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: Exploring the regional crop water footprint and its spatial and temporal distribution patterns and driving factors can help optimize agricultural production layouts, improve agricultural production and water use efficiency, and achieve sustainable agricultural development. This study quantified and analyzed the water footprint of major crops in 54 counties and districts in the Guanzhong region from 2000 to 2020. Pathway analysis was used to explore the driving factors influencing temporal and spatial changes in crop water footprint. Key findings revealed that: (1) The total water footprint of crops in the Guanzhong region decreased from 2.232×10^8 m^3 in 2000 to 2.003×10^8 m^3 in 2020. Blue water use was the most dominant, followed by gray water use, with green water use being the lowest, accounting for 37.261%, 36.254%, and 26.485%, respectively. (2) Significant spatial variations existed in the total crop water footprint, showing a high eastern and low western profile. Regions with similar crop water footprints (high- high or low- low) demonstrated an agglomeration distribution. (3) The crops' green water footprint was primarily influenced by yield per unit area, while the blue water footprint was mainly affected by average wind speed, followed by pesticide use and relative humidity. Additionally, fertilizer application had the greatest impact on the gray water footprint. This finding suggests that agricultural input factors significantly outweigh meteorological factors in influencing the crop water footprint. Consequently, production level and agricultural inputs were primarily responsible for regional water footprint variability. Potential strategies for regulating crop water footprint include: (1) implementing reasonable allocation of precipitation to improve green water utilization to achieve optimal allocation and use of water resources; (2) enhancing irrigation practices by improving irrigation facilities, increasing irrigation efficiency, and reducing irrigation water resource consumption, particularly as irrigation is a significant contributor to the blue water footprint in agricultural water consumption; (3) reducing fertilizer application and pesticide use while ensuring crop yield to minimize water consumption caused by water environment pollution, thereby controlling agricultural water consumption and alleviating pressure on water resources. These study results are beneficial for conserving water resources and improving water use efficiency in the Guanzhong region. They provide crucial support for facilitating sustainable agricultural water management practices.

Keywords: crop; water footprint; influencing factors; spatiotemporal distribution; Guanzhong region